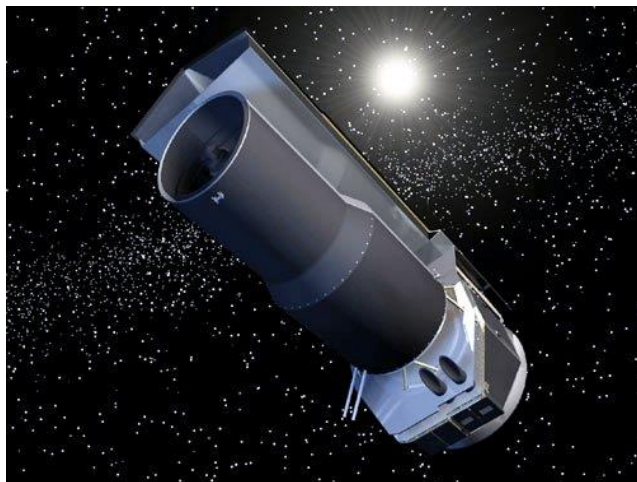


Burbujas Infrarrojas de polvo

Cristina Cappa

El Universo radia continuamente y de esta manera envía señales en todo el espectro electromagnético. Sin embargo, no toda esta radiación llega a la superficie terrestre. Este es el caso de algunas bandas en la región infrarroja del espectro electromagnético, tanto en el infrarrojo cercano (con longitudes de onda entre 1 y 5 μm (1)), mediano (entre 5 y 30 μm) y lejano (de 30 a algo más de 1000 μm), en las que los componentes de la atmósfera terrestre absorben parte de esta radiación. Por eso, para analizar la emisión en ciertas porciones de estas bandas es necesario utilizar satélites.



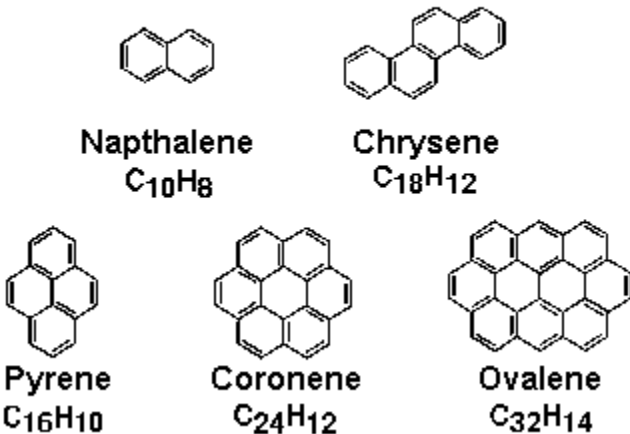
El satélite Spitzer de la NASA fue lanzado el 25 de agosto de 2003, en una órbita alrededor del Sol a una distancia similar a la de la Tierra, y fue la culminación de una serie de satélites para detección de radiación infrarroja. Otras misiones exitosas anteriores, como los satélites IRAS lanzado en 1986 y el satélite MSX a partir de 1996 mostraron la riqueza del universo en las bandas infrarrojas, un universo oculto a nuestros ojos adaptados a la luz visible.

El satélite Spitzer (Fig. 1) tiene instrumental para obtener imágenes y espectros. Las imágenes obtenidas en las bandas de 3.6, 4.5, 5.8 y 8 μm tienen una resolución angular de entre 1.5 y 1.9 segundos de arco y se obtuvieron con la cámara infrarroja IRAC a bordo del satélite, mientras que en 24 μm , las imágenes tienen 6

segundos de arco de resolución angular.

La resolución espacial obtenida con la cámara IRAC es excelente y permite analizar el medio interestelar con algún detalle. Se obtuvieron también imágenes en 70 y 160 μm , aunque en estas dos últimas longitudes de onda las imágenes obtenidas no tuvieron la sensibilidad esperada.

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons



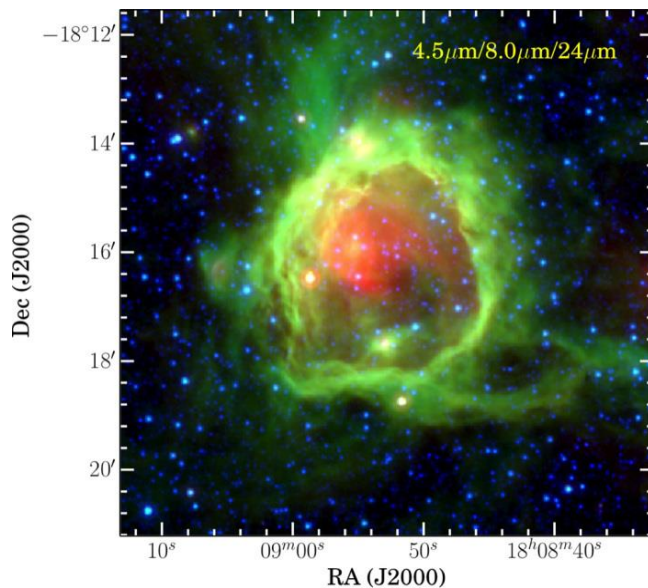
El principal responsable de la emisión en el infrarrojo es el polvo interestelar, que absorbe radiación en la banda ultravioleta y visible y la reemite en el infrarrojo, aunque también las moléculas presentes en el espacio contribuyen con su emisión.

Cada una de las diferentes bandas de Spitzer está dominada por diferentes procesos de emisión cuando se observa en la vecindad de una estrella caliente. Los objetos más brillantes en 3.6 μm son estrellas, pero también contiene contribuciones de una débil línea de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs por su sigla en inglés, que seguiremos usando en este texto) presentes en 3.3 μm , y posiblemente de emisión dispersada estelar. La banda de 4.5 μm

contiene emisión de las líneas Br α y Pf β (emitidas por el gas ionizado en regiones HII), y de líneas roto-vibracionales del Hidrógeno molecular (H_2) y del Monóxido de Carbono (CO) originadas en gas molecular que ha sido perturbado por una onda de choque. Las fuentes más brillantes en esta banda también son estrellas. La emisión en la banda de 5.8 μm contiene una línea intensa de los PAHs presente en 6.2 μm , que puede dominar la

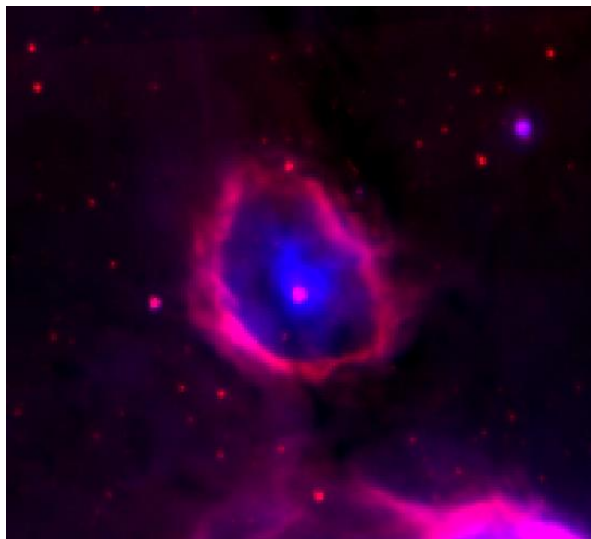
emisión difusa, excepto muy cerca de estrellas masivas, donde los PAHs son destruidos por la radiación ultravioleta. En cambio, cerca de estrellas masivas, la emisión en esta banda corresponde básicamente a emisión térmica del polvo interestelar. Finalmente, la banda de 8 μm está dominada por dos fuertes líneas de emisión de los PAHs en 7.7 y 8.6 μm , aunque cerca de estrellas masivas, la emisión térmica del polvo tiene importancia. Por otro lado, la emisión en 24 μm se debe básicamente a polvo interestelar a temperaturas de algunos cientos de grados Kelvin.

Y ya que hemos mencionado los PAHs, digamos que son macromoléculas compuestas por cadenas de átomos de Carbono, en las que la estructura básica es el anillo de benceno (ver Fig. 2 donde se muestran algunos de los PAHs más simples), formados precisamente por átomos de Carbono y de Hidrógeno. Pueden contener hasta 80 átomos de Carbono en el espacio. En la tierra se obtienen como subproducto de la quema de combustibles fósiles.



Las imágenes en el mediano infrarrojo del plano de nuestra Galaxia obtenidas primeramente con el satélite MSX con resolución angular de 18 segundos de arco y luego con Spitzer con mucho mejor resolución, revelaron un gran número de burbujas que tienen cáscaras externas brillantes en 8 micrones y un interior también brillante pero en 24 micrones, y a las que se ha dado en llamar **burbujas infrarrojas de polvo** (ver Figs. 3 y 4). La emisión en 8 micrones ha permitido catalogar unas 600 burbujas infrarrojas en una región que se extiende 130 grados en el plano galáctico, con un ancho de 2.2 grados. Este número se extendió a 5100 burbujas con el Milky Way Project.

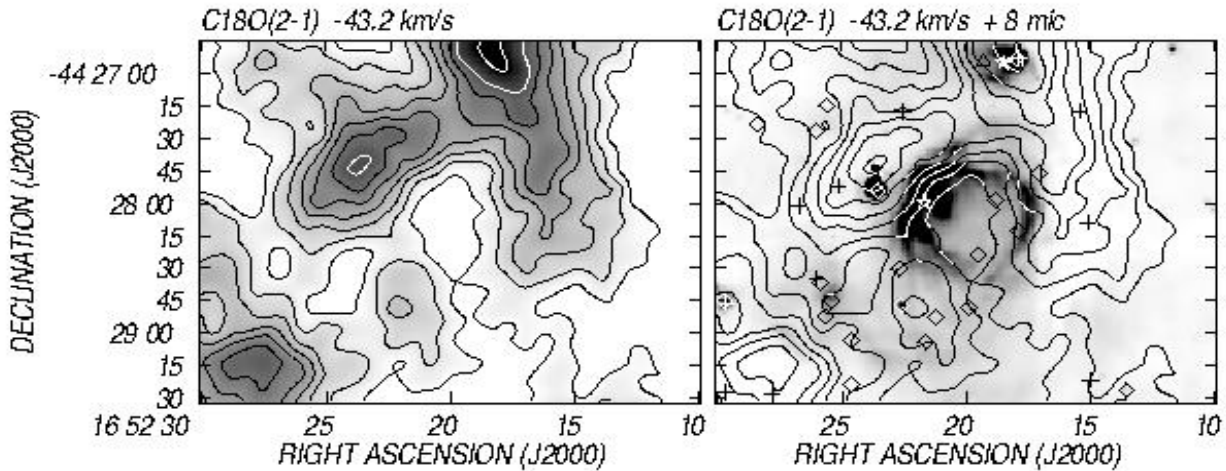
Las burbujas se identifican como anillos parciales o completos en 8 μm , que muchos autores arguyen son representaciones en dos dimensiones de burbujas en tres dimensiones. Son pequeñas, miden unos pocos minutos de arco. Ya desde los primeros trabajos quedó claro que las burbujas infrarrojas estaban distribuidas de modo similar a las estrellas masivas, coincidiendo muchas de ellas con regiones HII conocidas, y por tanto originadas en la acción de las estrellas masivas sobre el medio que las circunda.



Estas burbujas constituyen una herramienta importante para estudiar la interacción de estrellas masivas con el medio interestelar. Las estrellas masivas ionizan el gas (por medio de fotones ultravioletas con energía mayor a 13.6 eV), aumentan la temperatura del polvo interestelar en su vecindad (por eso se detectan en 24 μm), y suelen tener vientos estelares, un viento de partículas que fluye de la estrella.

El gas ionizado, a mayor temperatura, se expande, y junto con los vientos estelares, que contribuyen también a la expansión, comprimen el gas atómico y molecular que circunda a la burbuja, favoreciendo la formación de cáscaras de gas molecular denso y de polvo a bajas temperaturas asociado a este gas frío y denso.

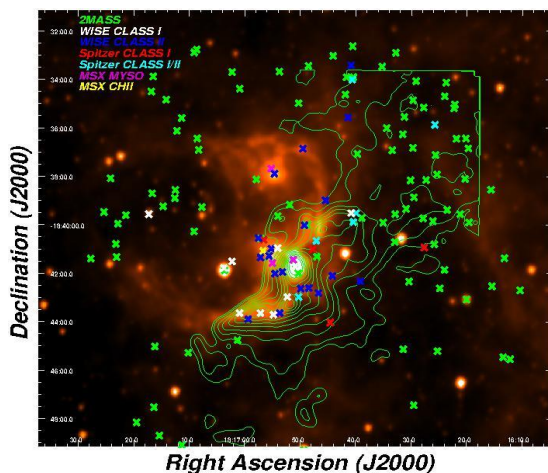
Entre el interior ionizado y caliente y el exterior frío y denso se forma una región de fotodisociación, donde las moléculas son disociadas por la acción de fotones estelares con energías menores a 13.6 eV que escapan del interior de la burbuja. Estos fotones excitan los PAHs que están mezclados con el gas y polvo interestelares emitiendo radiación detectable en 5.8 y 8 μm . De esta manera, la emisión de los PAHs muestra la posición de la región de fotodisociación.



La cáscara molecular densa y fría que rodea a las burbujas se identifica perfectamente en moléculas, de las cuales el Monóxido de Carbono (CO) es una de las más fáciles de detectar. Es importante decir que el principal componente de estas regiones moleculares es el Hidrógeno molecular, la molécula más abundante en el universo. Las líneas de CO se detectan en la región milimétrica del espectro, con longitudes de onda en 2.7, 1.3, 0.7 mm. El panel izquierdo de la Fig. 5 muestra la emisión del CO en contornos y grisados en la vecindad de la burbuja infrarroja S 24, mientras que el panel derecho muestra la superposición de los mismos contornos del panel izquierdo y la emisión en 8 μm de la burbuja en tonos de gris. Se aprecia que la emisión molecular bordea la burbuja, formando una cáscara molecular, coincidiendo el borde interno de la emisión molecular con la emisión en 8 μm .

Así, el estudio en diversas longitudes de onda de las burbujas infrarrojas muestra que están conformadas, de adentro hacia afuera, por gas ionizado y polvo tibio, una región de fotodisociación que limita el interior y una cáscara densa externa formada por gas molecular denso y polvo frío.

Algunos comentarios merece esta breve descripción. Por un lado, la existencia de gas ionizado y polvo tibio indica que hay estrellas masivas en el interior de las burbujas, aunque en la mayoría de los casos, estas no están identificadas, generalmente debido a la alta extinción visual ya que estas estructuras evolucionan en regiones de alta densidad. De hecho, la gran mayoría de ellas (y entre ellas las que mostramos en las figuras) no muestran emisión en el rango óptico como las regiones HII típicas. Sin embargo, el estudio de las características del interior de las burbujas permite estimar los parámetros de las estrellas necesarias para su formación.



Por otro lado, en la cáscara densa pueden darse las condiciones para que se formen grumos de mayor densidad que terminen colapsando y formando una nueva generación de estrellas. Estos objetos estelares jóvenes o estrellas en formación se identifican en los catálogos de fuentes puntuales infrarrojas analizando la distribución espectral de energía, ya que la distribución esperada para una estrella en formación es diferente a la de una estrella completamente formada. El análisis de las características de estas fuentes ha permitido detectar numerosas estrellas en formación coincidentes con las cáscaras moleculares y en particular con las

regiones más densas y frías de esas cáscaras. Una burbuja con estas características es N 5, que se muestra en la Fig. 6. Los diferentes símbolos corresponden a estrellas en formación proyectadas en la zona. Es evidente de la figura la gran cantidad de estrellas en formación proyectadas sobre la nube molecular que limita la parte derecha de la burbuja. Seguramente, muchos de estos objetos emergerán como estrellas masivas dentro de algunos millones de años.

La morfología de estas burbujas da información sobre la fuerza y direccionalidad de los vientos estelares y permite estimar la posición de las estrellas masivas no catalogadas y sus características, así como estudiar la estructura y propiedades físicas del medio en el que evolucionan y se expanden. La presencia de pilares y bordes internos bruscos en las burbujas nos hablan de la mecánica de la expansión, de la evaporación de gas y sublimación del polvo en las burbujas en expansión y de la pérdida de masa estelar durante la evolución de la estrella.

Las estrellas en formación ubicadas sobre la cáscara externa densa y fría, por otro lado, nos permiten estudiar el medio ambiente durante los primeros estadios de formación estelar.

(1) Un micrón (μm) es la milésima parte de un milímetro. Una longitud de onda $\lambda = 8 \mu\text{m}$, por ejemplo, corresponde a 0,008 mm, o a 80.000 Angstrom. Es ilustrativo recordar que la luz visible, con una $\lambda = 5000$ Angstrom, corresponde a 0,0005 mm.

Figura 1. Imagen del satélite Spitzer.

Figura 2. Estructura de algunos PAHs simples.

Figura 3. Imagen de la burbuja infrarroja de polvo N 4 mostrando la emisión en tres longitudes de onda con diferentes colores: 4.5 μm en azul, 8 μm en verde y 24 μm en rojo. La emisión en 8 μm define la burbuja infrarroja, mientras que la emisión en 24 μm se detecta en el interior.

Figura 4. Imagen de la burbuja IR S 21. En azul la emisión en 24 μm y en fucsia la emisión en 8 μm .

Figura 5. Panel izquierdo. Emisión en contornos y grisados del Monóxido de Carbono hacia la burbuja S 24. Cuanto más oscura la región, mayor cantidad de gas molecular está presente. **Panel derecho.** Los mismos contornos del panel izquierdo superpuestos a la emisión en 8 μm de la burbuja.

Figura 6. Burbuja infrarroja N 5. En anaranjado se muestra la emisión en 8 μm . Los contornos verdes muestran la emisión del CO. Los diferentes símbolos muestran la ubicación de estrellas en formación obtenidas de diferentes catálogos.